

Reducción de psicofármacos en aguas residuales después de la filtración con membranas

Isabel Del Castillo , Aurelio Hernández , Ma. Estela Montes

Resumen: Se analiza la presencia de diferentes psicofármacos en el agua residual y los rendimientos de eliminación obtenidos en una depuradora convencional. Los psicofármacos prácticamente no se eliminan en el tratamiento biológico. Sin embargo, se ha obtenido una biodegradación considerable debido al tipo de compuesto y de la edad del fango. Además se estudian las retenciones de estos compuestos empleando tratamientos terciarios convencionales y plantas piloto de ultrafiltración y nanofiltración. Las eliminaciones obtenidas no difieren demasiado de un tipo de membrana a otro a pesar del diferente tamaño de paso entre ellas.

Palabras clave: Fármacos, psicofármacos, tratamiento terciario, ultrafiltración, nanofiltración.

Abstract: The presence of different psychotropic drugs in wastewater was analyzed, as well as the removal efficiencies obtained in a conventional treatment plant. The psychotropic drugs was no eliminated with the biological treatment. However, we have obtained substantial biodegradation due to the type of compound and the mud age. Besides the withholding of these compounds using conventional tertiary treatment and ultrafiltration and nanofiltration in pilot plants were studied. The deletions obtained with the membranes do not differ greatly from one type to another, despite the different size each other.

Key words: Pharmaceuticals, psychotic drugs, tertiary treatments, ultrafiltration, nanofiltration.

Introducción

En los últimos años se han publicado bastantes estudios relativos a la presencia de fármacos y productos de higiene personal (PPCPs) en aguas residuales y en aguas superficiales empleadas como fuentes para abastecimiento, debido a su posible riesgo sobre el hombre y vida acuática incluso a concentraciones traza ($\mu\text{g/l}$ ó ng/l). Los PPCPs representan un gran grupo de compuestos que incluyen medicamentos y productos de cosmética e higiene personal (fragancias, champús, cosméticos, protectores solares, etc.).

Los fármacos están formados por moléculas grandes y químicamente complejas, pero muy diferentes en peso molecular, estructura, funcionalidad, forma, etc. Algunos de estos compuestos son polares y no volátiles por lo que es difícil que se escapen del medio acuático. Su persistencia es variable y pueden acumularse induciendo efectos adversos en los organismos vivos incluso a concentraciones por debajo de los $\mu\text{g/l}$.

Los principios activos de los fármacos están diseñados para ser muy eficaces e interaccionar con receptores específicos en el hombre y animales, o bien para resultar tóxicos para organismos infecciosos como bacterias, parásitos, etc. Estas características y la posible exposición continuada de los organismos acuáticos a este tipo de compuestos, los hacen potencialmente dañinos o perjudiciales para la fauna y flora acuática.

Además aunque a corto plazo no se pueden detectar efectos graves sobre la salud o sobre el medio ambiente, son probables efectos potencialmente acumulativos de los fármacos a medio o largo plazo, proliferación de microorganismos resistentes a los antibióticos y alteración de la estructura de las comunidades biológicas.

También parece posible que la combinación de diferentes metabolitos y compuestos biológicamente activos produzcan efectos sinérgicos o aditivos, aunque es un tema todavía bastante desconocido. La vía de exposición al hombre puede ser la presencia en el agua potable de cantidades traza, el consumo de peces que tengan acumulados fármacos o sus derivados o el baño en aguas superficiales que estén contaminadas con estos compuestos. Sin embargo las pequeñas cantidades a las que está expuesto el hombre no parecen ser preocupantes a corto plazo.

Dentro de los fármacos pueden considerarse como más representativos los grupos terapéuticos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales grupos terapéuticos

Grupo terapéutico	Función	Principios activos
Antinflamatorios y analgésicos	Combatir el dolor e inhibir la síntesis de compuestos involucrados en la respuesta inflamatoria. Tienen propiedades analgésicas y antipiréticas.	Paracetamol, Ácido acetilsalicílico, Ibuprofeno, Diclofenac, Naproxeno
Antidepresivos y sedantes	Aumentar la actividad de ciertos neurotransmisores inhibidores, produciendo disminución de la ansiedad y relajación muscular.	Fluoxetina, Paroxetina, Venlafaxina, Diazepam, Lorazepam, Bromazepam
Anticonvulsivos	Evitar la acumulación excesiva, rápida y repetitiva de impulsos eléctricos, manteniendo normal la actividad cerebral.	Carbamacepina
Antineoplásicos	Tratamiento del cáncer	Bisulfan, Ciclofosfamidás
Hipolipemiantes	Bajar los niveles de colesterol en sangre en personas con arterioesclerosis. Reducen los niveles de triglicéridos y aumentan los niveles de HDL (fibratos) o actúan sobre el LDL (estatinas).	Bezafibrato, Simvastatina, Atorvastatina, Pravastatina
Betabloqueantes	Bloquear los receptores beta del corazón, disminuyendo la necesidad de oxígeno, reduciendo el ritmo cardíaco y la fuerza de contracción del corazón y vasos sanguíneos. Combaten la hipertensión arterial, angina de pecho, arritmias cardíacas, etc.	Atenolol, Propanolol, Metoprolol, Amlodipina
Antiulcerosos	Bloquear los receptores H1 y H2 de la histamina, reduciendo su unión a estos receptores y evitando así la producción de ácido. Combaten la acidez de estómago, úlceras y otras alteraciones estomacales	Ranitidina, Omeprazol, Pantoprazol, Lansoprazol
Antiprostáticos	Antagonista de receptores α -adrenérgicos. Trata la hiperplasia prostática benigna.	Tamsulosina
Antibióticos	Destruir o detener el crecimiento de organismos infecciosos	Sulfonamidas, Trimetropin Fluoroquinolonas
Psicofármacos y drogas de abuso	Sustancias que alteran la mente sin una necesidad médica y que con frecuencia son objeto de abuso	Cocaína, Metadona, Heroína, Anfetaminas

Presencia de fármacos en las aguas y eliminación en procesos de depuración

Los fármacos llegan al agua residual a través de la orina o residuos fecales del hombre. Es decir el medicamento es absorbido por el paciente y es metabolizado por diversos mecanismos, excretándose en forma de conjugados, como un metabolito principal, o como una mezcla de varios metabolitos. La parte no absorbida, muchas veces una fracción significativa de la sustancia original, puede ser excretada sin metabolizar a través de la orina o heces. Las formas conjugadas de los fármacos (derivados más polares y solubles en agua y menos tóxicos que el compuesto original), pueden convertirse otra vez en sus formas activas por vía enzimática o por hidrólisis química entre la recogida de las aguas residuales y la salida de las depuradoras. La desconjugación ocurre en parte debido a la presencia de la bacteria *Escherichia coli* en los desechos fecales, ya que esta bacteria sintetiza la enzima β -glucuronidasa, responsable de la transformación anterior.

Gran parte de estas sustancias no son eliminadas totalmente en las depuradoras, lo que significa que los medios receptores están continuamente expuestos a los fármacos que no han sido eliminados. Los principales mecanismos de eliminación de estos compuestos durante el tratamiento de las aguas residuales son la biodegradación y la adsorción.

Además las concentraciones ambientales de los fármacos pueden diferir de unos países a otros ya que depende de los patrones de consumo, así como de los diferentes procesos de tratamiento de depuración de aguas.

Metodología

Fundamentado en lo expresado anteriormente se decidió realizar una investigación consistente en estudiar la concentración de diferentes fármacos en agua residual, su grado de eliminación en un sistema de depuración convencional de fangos activos, y la eficacia en la retención de estos compuestos utilizando tratamientos terciarios convencionales (coagulación-floculación seguida de filtración rápida sobre arena) y sistemas de filtración con membranas con diferentes tamaños de paso. Esto permite predecir en función de los distintos tratamientos, cuál es la reducción de estas sustancias y las concentraciones vertidas a los cauces receptores.

Los fármacos a estudiar se seleccionaron de forma que aparecieran diferentes grupos terapéuticos y dentro de ellos los más empleados habitualmente. De esta forma se decide evaluar el comportamiento de: Ibuprofeno y Naproxeno (analgésicos y antiinflamatorios), Bezafibrato (hipolipemiente), Carbamacepina (anticonvulsivo), Propanolol (betabloqueante), Ranitidina (antiulceroso), Sulfametoxazol y Eritromicina (antibióticos), y benzodiacepinas, opiáceos, cocaína y metadona (psicofármacos y drogas de abuso).

Tabla 2. Características de los penetrantes al sistema de membranas

Compuesto	Fórmula molecular	P.M.	log K _{ow}	pK _a
Acetaminofen	C ₈ H ₉ NO ₂	151	0.5	9.4
Ibuprofeno	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	206	4.0	4.9
Naproxeno	C ₁₄ H ₁₄ O ₃	230	3.2	4.2
Bezafibrato	C ₁₉ H ₂₀ ClNO ₄	362	4.3	---
Mevastatina	C ₂₅ H ₃₈ O ₅	391	4.0	---
Carbamazepina	C ₁₅ H ₁₂ N ₂ O	236	2.4	13.9
Diazepam	C ₁₆ H ₁₃ ClN ₂ O	285	2.8	3.3
Ranitidina	C ₁₃ H ₂₂ N ₄ O ₃ S	314	1.1	8.2-2.7
Atenolol	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O ₃	266	0.2	9.2
Propanolol	C ₁₆ H ₂₁ NO ₂	260	3.5	9.4
Eritromicina	C ₃₇ H ₆₇ NO ₁₃	734	3.1	8.9
Sulfametoxazol	C ₁₀ H ₁₁ N ₃ O ₃ S	253	0.9	5.8
Trimetoprim	C ₁₄ H ₁₈ N ₄ O ₃	290	0.8	7.1
Azitromicina	C ₃₈ H ₇₂ N ₂ O ₁₂	749	0.9	8.7
Cocaína	C ₁₇ H ₂₁ NO ₄	304	2.3	8.6
Metadona	C ₂₁ H ₂₇ NO	310	0.9	8.3

La depuradora seleccionada dispone de los siguientes procesos básicos en la línea de agua: pretratamiento-tratamiento primario con adición de reactivos-tratamiento biológico por fangos activos-tratamiento terciario (microfloculación y filtración sobre arena). Los puntos de la depuradora en los que se efectuó la toma de muestras tres veces por semana están representados en la figura 1.

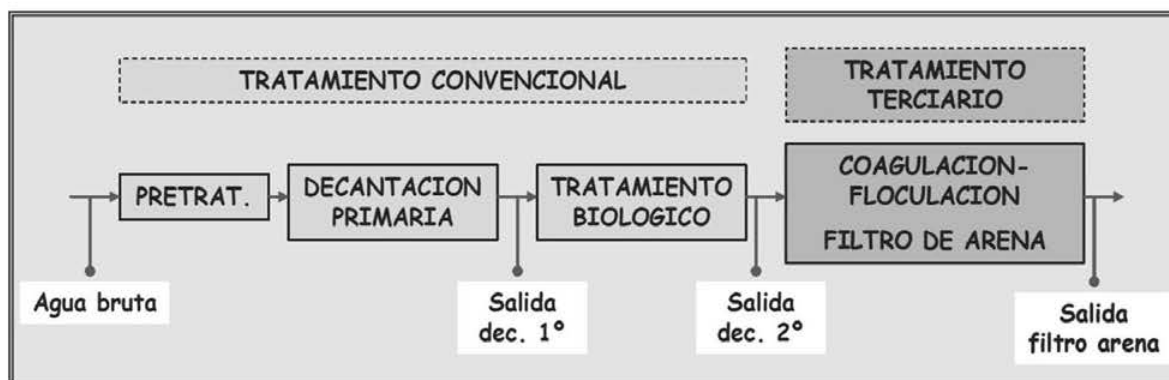


Figura 1: Puntos de muestreo de la depuradora seleccionada

La eficacia de los tratamientos de membrana en la separación de estas sustancias se realizó empleando dos plantas piloto con membranas que trabajaban en el rango de la ultrafiltración y de la nanofiltración. Las plantas se alimentaban con el efluente del filtro de arena de la depuradora, y se operaban 3 días a la semana durante los cuales se tomaban muestras a la salida de las dos plantas de membranas. En la figura 2 se muestran los puntos de toma de muestra para evaluar el rendimiento de estos tratamientos.

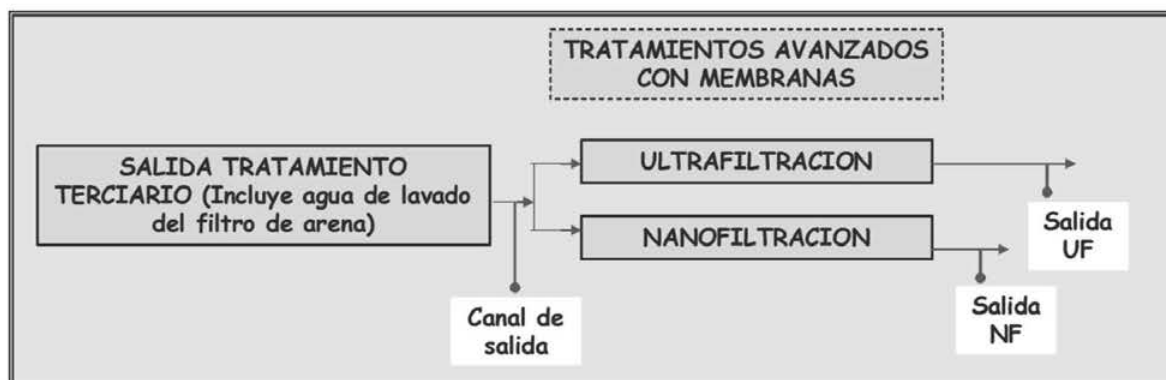


Figura 2: Puntos de toma de muestra para evaluar el rendimiento de estos tratamientos

La planta piloto de membranas de ultrafiltración utilizada es el modelo M38HR-9-3 fabricada por Dow Danmark A/S. Tiene una capacidad máxima de 2500 l/h y está compuesta por un tanque de balance o depósito de agua de 200 litros de capacidad, una bomba de alimentación con caudal de 2.5 m³/h y altura máxima de impulsión de 32.4 m, una bomba de recirculación, un módulo para membranas de ultrafiltración, un filtro de seguridad de 100 micras, un termostato, un intercambiador de calor, y válvulas e instrumentos necesarios para la medición y operación de la planta. El nivel del tanque se controla automáticamente por la apertura y cierre de las válvulas de

entrada, así mismo, cuenta con un control automático para calentamiento y enfriamiento del agua y un compresor de aire de 1.5 HP empleado para los propósitos de regulación. Las especificaciones de las membranas de ultrafiltración son: tipo DSS-GR95PP, tamaño del poro de 2000 Daltons, rango de operación de pH de 1-13, temperatura de 0- 75°C (30°C), presión de 1-10 bar (4 bar) y el material de la membrana de polietersulfona.

La planta a escala piloto de membranas de nanofiltración utilizada es modelo LabStak M20 fabricada por Alfa Laval Naksskov A/S. La planta piloto de Nanofiltración es una planta que permite trabajar en todos los rangos de filtración (Ósmosis inversa, Nanofiltración, Ultrafiltración y Microfiltración), tiene una capacidad aproximada de 3.5 a 24 l/min.

Está compuesta por un tanque de 7 Lts., una bomba de alta presión, un filtro de seguridad, un intercambiador de calor, válvulas y manómetros. Tiene una bomba de alimentación con una capacidad de 8 l/min a una presión de 64 bar, con un motor de 3 KW. El área de membranas es de 0.036 a 0.72 m², con 0.018 m² por membrana. El rango de temperatura al que trabajan es de 0 a 60°C y el del pH de 1 – 14.

Especificaciones de las membranas de nanofiltración: tipo DSS-NFT-50, rechazo de MgSO₄ > 99% (Medido en 2000 ppm MgSO₄, 9 bar, 25°C), rango de operación de pH de 2-10, temperatura de 0- 50°C (25°C), presión de 1-55 bar (38 bar), material de la membrana de poliéster. Especificaciones de las membranas de ósmosis inversa: tipo DSS-HR98PP, rechazo de NaCl > 96% (medido en 2000 ppm MgSO₄, 9 bar, 25°C), rango de operación de pH de 2-10, temperatura de 0- 50°C (25°C), presión de 1-55 bar (38 bar) y material de la membrana de polipropileno.

Las muestras tomadas en cada punto fueron compuestas sobre 24 horas proporcionales al caudal tratado, tomándose las mismas por medio de muestreadores automáticos. En cada muestra se analizaron los fármacos anteriormente citados y las características del agua (DQO, SS, turbidez, nitrógeno total y fósforo total).

A continuación aparecen las plantas piloto utilizadas y características de las mismas.

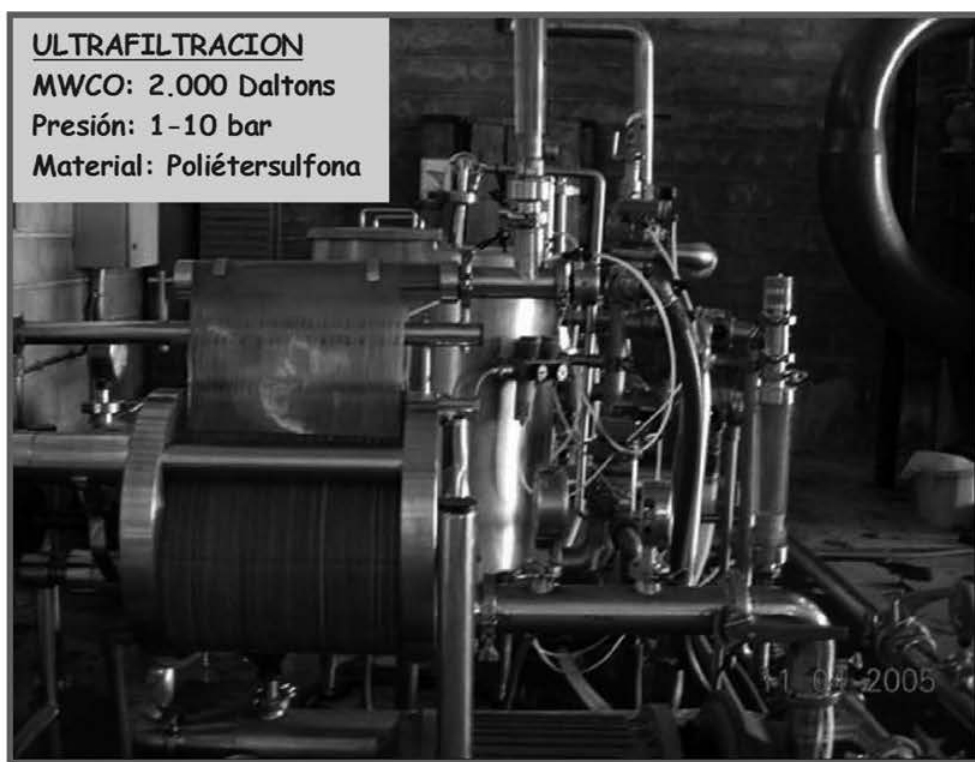


Figura 3: Planta piloto de Ultrafiltración

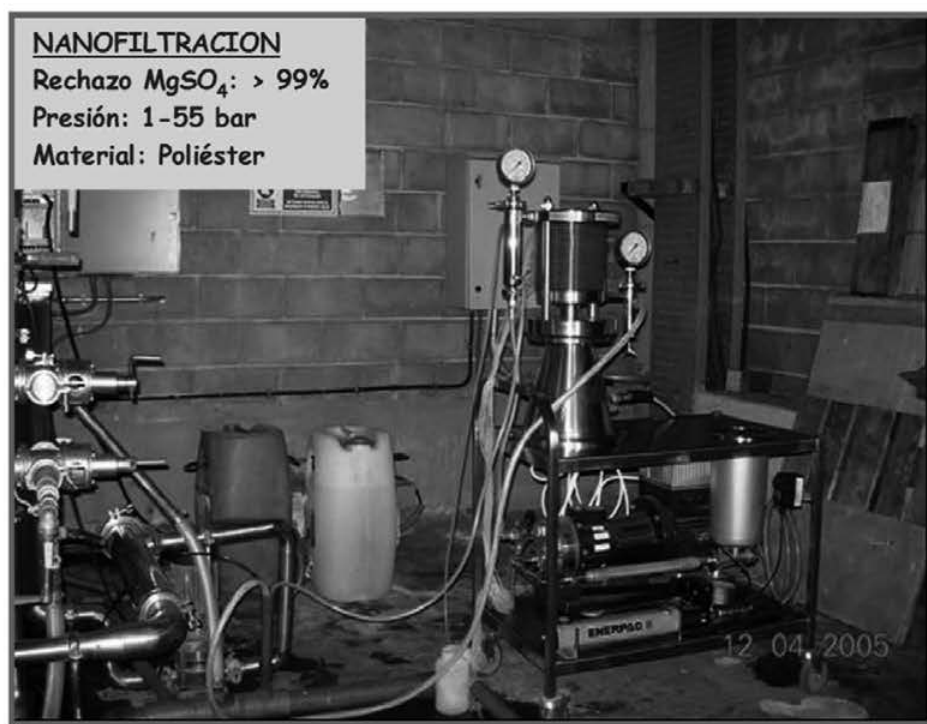


Figura 4: Planta piloto de Nanofiltración

Los análisis de ibuprofeno, carbamacepina, bezafibrato, eritromicina, ranitidina, sulfametoxazol, propanolol y naproxeno se realizaron empleando extracción en fase sólida (SPE) seguido de cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas triple cuadrupolo (LC-MS/MS) mediante ionización electrospray. El límite de detección del método (MDL) varía entre 0.002 a 0.020 ng/mL. La precisión del método, calculada como desviación standard relativa (RSD), oscila del 0.2 al 6% y del 1 al 11% en el análisis en días diferentes y en análisis en el mismo día, respectivamente.

Los análisis de benzodiacepinas, cocaína, metadona y opiáceos se realiza por inmunoanálisis de polarización de la fluorescencia especialmente indicado para fármacos de pequeño tamaño molecular, basado en la generación de especies altamente reactivas a partir de precursores estables sobre la superficie de un electrodo y la reacción de unas con otras con producción de luz. Se fundamenta en la reacción del complejo $[Ru(bpy)_3]^{2+}$ con tripropilamina (TPA), cuyo producto quimioluminiscente final se forma durante la fase de detección.

Resultados y discusión

Como puede apreciarse en la tabla 2 algunos de los compuestos seleccionados en este estudio tienen valores tan bajos que su concentración no ha llegado ni siquiera en el agua residual bruta a alcanzar los límites de detección del método analítico empleado para su análisis. Se trata de los antibióticos (eritromicina y sulfametoxazol), el betabloqueante propanolol y el antiulceroso ranitidina.

Tabla 3. Concentraciones medias de fármacos detectadas en el proceso convencional de la depuradora

Principio activo	Entrada EDAR (µg/l)	Salida tratamiento Primario (µg/l)	Salida tratamiento Biológico (µg/l)
Ibuprofeno	11.78	8.76	2.80
Naproxeno	2.80	2.42	1.37
Bezafibrato	0.41	0.13	0.08
Carbamacepina	0.18	0.15	0.17
Ranitidina	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Sulfametoxazol	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Eritromicina	< 0.006	< 0.006	< 0.006
Propanolol	< 0.007	< 0.007	< 0.007
Psicofármacos y drogas	Entrada EDAR (ng/l)	Salida tratamiento primario (ng/l)	Salida tratamiento biológico (ng/l)
Benzodiacepinas	16.87	12.58	12.27
Opiáceos	15.20	8.93	13.44
Cocaína	28.35	27.69	26.82
Metadona	37.35	33.58	33.05

Entre los medicamentos estudiados el principio activo que se ha encontrado a mayor concentración en el agua residual ha sido, como era de esperar, el ibuprofeno (analgésico y antiinflamatorio de uso generalizado muy común). Las concentraciones observadas en la entrada a la planta han oscilado entre 4.23 y 20.11 µg/l con un valor medio de 11.78 µg/l.

También se han encontrado en el agua bruta concentraciones bastante significativas de naproxeno (otro analgésico de uso menos frecuente) y de bezafibrato (hipolipemiante). Las concentraciones de medias de naproxeno es 2.88 µg/l, habiendo oscilado sus valores entre 0.74 y 5.50 µg/l. En el caso del bezafibrato las concentraciones de entrada a la planta se encontraron entre 0.01 y 3.87 µg/l con un valor medio de 0.41 µg/l.

El principio activo que aparece en el agua residual en la concentración detectable más baja es la carbamacepina, con valores medios de 0.18 µg/l e intervalos entre 0.01 y 0.34 µg/l.

Los valores de los psicofármacos y drogas de abuso analizados se han presentado en el agua residual bruta siempre en concentraciones mucho más bajas que los fármacos anteriores, es decir a niveles de ng/l. Las mayores concentraciones se han observado para la cocaína y metadona (valores medios de 28.35 y 37.85 ng/l respectivamente), con menores rangos de oscilación para la cocaína (entre 17.56 y 42.12 ng/l) que para la metadona (entre 2 ng/l y 60.08 ng/l). Las benzodiacepinas y opiáceos en el agua residual han presentado concentraciones medias similares (16.87 ng/l y 15.20 ng/l respectivamente) variando los valores detectados en 2 y 32.45 ng/l para las benzodiacepinas y entre 4.69 y 24.24 ng/l para los opiáceos.

Los compuestos hidrofóbicos parece ser que pueden separarse por fenómenos de adsorción a los sólidos, por ello dependiendo del tipo de fármaco pueden apreciarse eliminaciones más o menos grandes en el tratamiento primario.

Algunos autores (Strenn, 2004; Clara, 2004) han indicado que la eliminación de bezafibrato (10-97%) e ibuprofeno (12-86%) en las depuradoras de aguas residuales es variable, demostrándose que esta variación depende de la edad del fango. Así con temperaturas de 10°C y edades del fango de 5 días pueden observarse eliminaciones de ibuprofeno hasta mayores del 90% (Tauxe-Wuersch, 2005).

En esta investigación, el bezafibrato e ibuprofeno presentan reducciones medias globales altas (80% y 76% respectivamente), debido fundamentalmente a procesos de biodegradación en el tratamiento biológico (edad del fango > 5 días). Estos datos concuerdan con los expuestos por los autores citados anteriormente.

La bibliografía consultada no da resultados claros sobre las eliminaciones de naproxeno en sistemas convencionales de depuración (66% en estudios en Alemania, entre 40-55% en España, y entre 55-98% en Finlandia) y tampoco se muestra una clara influencia de la edad del fango. En este estudio las eliminaciones medias para este analgésico han sido en torno al 50%, bastante más baja que la obtenida para el ibuprofeno y bezafibrato.

Por último, la carbamacepina parece ser un compuesto claramente no biodegradable y persistente a los tratamientos biológicos de depuración, ya que los resultados obtenidos en este estudio han mostrado rendimientos medios de eliminación no significativos (aproximadamente un 5%). Gran parte de la bibliografía consultada (Ternes, 1998; Heberer, 2002; Clara, 2004; Strenn, 2004) coincide en este hecho, achacando esta baja o nula reducción a la naturaleza hidrofílica de este principio activo ($\log K_{ow} < 3$) y a su estabilidad química (Tauxe-Wuersch, 2005).

En cuanto a las drogas y psicofármacos las eliminaciones globales son bajísimas, y prácticamente nulas en la etapa biológica del tratamiento lo que indica su poca biodegradabilidad. Parece ser que la pequeña fracción que se separa del agua residual es por adsorción a los sólidos en el tratamiento primario.

Dado que la eliminación de estos compuestos era en unos casos muy baja, en otros variable, pero nunca total en un proceso de depuración convencional, se estudió el efecto que podía tener el tratamiento terciario convencional existente en la depuradora (microfloculación y filtración sobre arena) y los tratamientos avanzados de filtración con membranas ultra y nanofiltración a través de la operación de dos plantas piloto.

La tabla 3 muestra las concentraciones medias de los fármacos analizados a la salida de cada tratamiento. Las plantas piloto de ultrafiltración y la nanofiltración no se han ensayado en serie sino en ambos casos la alimentación procede del filtro de arena del tratamiento terciario.

Tabla 4. Concentraciones medias de fármacos detectadas después de tratamientos terciarios convencionales y membranas de ultra y nanofiltración

Principio activo	Salida trat. Terciario: Microfloculación + Filtros de arena (µg/l)	Filtros de arena + ultrafiltración (µg/l)	Filtros de arena + nanofiltración (µg/l)
Ibuprofeno	2.31	0.93	0.38
Naproxeno	1.79	0.49	0.24
Bezafibrato	0.09	0.02	0.01
Carbamacepina	0.18	0.09	0.07
Psicofármacos y drogas	Salida trat. Terciario: Microfloculación + Filtros de arena (ng/l)	Filtros de arena + ultrafiltración (ng/l)	Filtros de arena + nanofiltración (ng/l)
Cocaína	25.56	23.08	22.43
Metadona	34.66	24.06	21.59
Benzodiazepinas	15.40	10.51	8.00
Opiáceos	13.84	7.83	6.42

Los filtros de arena, como era predecible, no muestran ningún efecto significativo en la retención de fármacos.

En cuanto a los procesos de ultrafiltración y nanofiltración los efectos de los dos tipos de membrana ensayados no son muy distintos a pesar de la diferencia de tamaño de paso.

Las membranas de ultrafiltración empleadas (MWCO 2000 Daltons) teóricamente no deberían separar los fármacos estudiados (su peso molecular se encuentra entre 206 y 362) hasta que no se haya completado la etapa inicial de adsorción. Sin embargo, la presencia de partículas, que tienen la capacidad de adsorber contaminantes, pueden aumentar el potencial de la ultrafiltración para eliminar estos compuestos. Por ello, con estas membranas se han obtenido retenciones entre 48% y 76% para los principios activos, y entre 9% y 43% para los psicofármacos y drogas.

Los mejores resultados de separación se han logrado para el ibuprofeno, naproxeno y bezafibrato (83-86%), mientras que para la carbamacepina puede que las características de este principio activo, le impida llegar a separaciones tan elevadas (alrededor de 60%). En el caso de los psicofármacos y drogas de abuso las separaciones con la nanofiltración han sido bastante más bajas que para los principios activos anteriores, llegando incluso retenciones prácticamente nulas para la cocaína.

Conclusiones

Los principios activos de naturaleza más hidrofóbica pueden eliminarse por adsorción a los sólidos en suspensión, por lo que en parte son separados junto con el fango primario y con el fango en exceso del tratamiento biológico. La eliminación de algunos fármacos en los tratamientos biológicos como fangos activos se debe a procesos de biodegradación. La biodegradación es especialmente efectiva en la reducción de compuestos que no experimentan fácilmente fenómenos de adsorción. El ibuprofeno y el bezafibrato son los dos principios activos estudiados que resultan ser más biodegradables, ya que se han conseguido eliminaciones alrededor del 80%. El naproxeno puede decirse que tiene una biodegradabilidad media y la carbamacepina prácticamente nula. Por ello sería aconsejable que siempre que se pudiera se emplearan principios activos más biodegradables (por ejemplo entre los antiinflamatorios preferiblemente ibuprofeno frente a diclofenac que es menos biodegradable).

Los tratamientos terciarios convencionales (coagulación-floculación y filtración sobre arena) no tienen ningún efecto en la retención de fármacos.

En cuanto a los procesos de membrana, tanto la ultrafiltración como la nanofiltración consiguen obtener reducciones apreciables en general para los fármacos, no siendo demasiado significativas las diferencias apreciadas en función del tipo de membrana estudiado. Es decir, el paso de la membrana no es decisivo y en la separación de los medicamentos influyen otras características como la composición química y propiedades físicas de la membrana y del contaminante.

Los psicofármacos y drogas de abuso, si bien se encuentran a concentraciones mucho más bajas que los principios activos en el agua residual, han resultado ser más problemáticos en cuanto a su eliminación, ya que prácticamente no son degradados en el tratamiento biológico y además con las

membranas estudiadas las retenciones son menores, quizás debido a la naturaleza de estos compuestos y el tipo de membrana utilizado.

La falta de legislación sobre el contenido de fármacos admisibles en los vertidos de aguas depuradas impide decir con absoluta seguridad que los resultados de salida tan bajos obtenidos con las membranas sean suficientes para evitar daños a medio-largo plazo en los organismos vivos de los cauces receptores.

Por último, no hay que olvidar que el mejor resultado es el que se puede conseguir con el tratamiento biológico, ya que el compuesto se biodegrada y elimina. El proceso de biodegradación es desconocido actualmente. En el caso de los fármacos que han resultado algo biodegradables, el proceso ha sido una depuradora biológica de fangos activos que funciona con una edad del fango de 12 días. En el caso de las membranas el contaminante sólo se separa del agua, por adsorción a la capa de suciedad que se genera sobre la membrana, trasladándose el problema del agua al concentrado.

Los tratamientos con membranas no son la solución a la completa eliminación de fármacos, pero si se reducen sus valores apreciablemente, incluso a valores por debajo del límite de detección del método utilizado para su análisis.

Otra vía de eliminación de fármacos podrían ser los procesos de ozonización y oxidación avanzada, que pueden destruir los principios activos.

Independientemente de estos tratamientos existen algunas soluciones para minimizar la llegada de fármacos a las aguas residuales, como por ejemplo no medicarse innecesariamente, no verter restos de medicamentos a los sanitarios, etc.

Agradecimientos

Esta investigación se ha podido desarrollar gracias a la subvención concedida por la Dirección General de Política Tecnológica del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España en la convocatoria PROFIT 2004-2007.

Referencias

Boleda, M.R., Galceran, M.T., Ventura F. (2011) Behavior of pharmaceuticals and drugs of abuse in a drinking water treatment plant (DWTP) using combined conventional and ultrafiltration and reverse osmosis (UF/RO) treatments *Environmental Pollution*, 159(6) 1584-1591.

Castiglioni, S., Bagnati, R., Fanelli, R., Pomati, F., Calamari, D., Zuccato, E. (2006a) Removal of pharmaceuticals in sewage treatment plants in Italy. *Environmental Science Technoogy*, 40, 357-363.

Clara M., Strenn B., Ausserleitner M. and Kreuzinger N. (2004a) Comparison of the behaviour of selected micropollutants in a membrane bioreactor and a conventional wastewater treatment plant. *Water Science and Technology*, 50 (5). 29-36.

Clara M., Strenn B. and Kreuzinger N. (2004b) Carbamazepine as a possible anthropogenic marker in the aquatic environment: investigations on the behaviour of Carbamazepine in wastewater treatment and during groundwater infiltration. *Water Research*, 38 (4) 947-954.

Heberer T. (2002a) Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water. *Journal of Hydrology*, 266 (175-189).

Kümmerer (2004) Pharmaceuticals in the environment: source, fate, effects and risks. 2a. Edition. Edit. Springer-Verlag.

Kümmerer, K. (2009) The presence of pharmaceuticals in the environment due to human use – present knowledge and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 90 (2354-2366).

Santos, J.L., Aparicio, I., Alonso, E. (2007) Occurrence and risk assessment of pharmaceutically active compounds in wastewater treatment plants. A case study: Seville city (Spain). *Environment International*, 33, 596-601.

Strenn B., Clara M., Gans O. and Kreuzinger N. (2004) Carbamazepine, diclofenac, ibuprofen and bezafibrate-investigations on the behaviour of selected pharmaceuticals during wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 50 (5), 269-276.

Ternes Thomas A. (1998) Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Research*, 32 (11), 3245-3260.

Yoon, Y., Westerhoff, P., Snyder, S.A., Wert, E.C. (2006). Nanofiltration and ultrafiltration of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products. *Journal of Membrane Science*, 270, 88-100.

Zuccato, E., Chiabrando, C., Castiglioni, S., Calamari, D., Bagnati, R., Schiarea, S., Fanelli, R. (2005) Cocaine in surface waters: a new evidence-based tool to monitor community drug abuse. *Environmental Health of Global Access Science Source*, 4, 1-7.

Zuccato, E., Castiglioni, S., Bagnati, R., Chiabrando, C., Grassi, P., Fanelli, R. (2008) Illicit drugs, a novel group of environmental contaminants. *Water Research*, 42, 961-968.

Zwiener C. and Frimmel F. H. (2003) Short-term test with a pilot sewage plant and biofilm reactors for the biological degradation of the pharmaceutical compounds clofibric acid, ibuprofen and diclofenac. *The Science of the Total Environment*, 309, (1-3), 201-211.